第 37 卷第 22 期
2017 年 11 月
生　态　学　报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.37,No.22
Nov.,2017

DOI: 10.5846/stxb201609141863
张珍明,周运超,田潇,黄先飞.喀斯特小流域土壤有机碳空间异质性及储量估算方法.生态学报,2017,37(22):7647-7659.
Zhang Z M, Zhou Y C, Tian X, Huang X F.Study on spatial heterogeneity and reserve estimation of soil organic carbon in a small karst catchment.Acta Ecologica Sinica,2017,37(22):7647-7659.

喀斯特小流域土壤有机碳空间异质性及储量估算方法

张珍明[1,2],周运超[1,2,3,*],田　潇[1,2],黄先飞[1,2]
1 贵州大学贵州省森林资源与环境研究中心, 贵阳　550025
2 贵州大学林学院, 贵阳　550025
3 中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站, 安顺　562100

摘要:为了准确估算土壤有机碳储量,利用网格法采集 2755 个土壤剖面,共计 23536 个土壤样品,研究了喀斯特小流域土壤有机碳含量分布特征,并以“土壤类型法”为基准,对土壤分布面积、石砾含量、岩石裸露率、土层厚度等指标进行修正,合理的优化了土壤有机碳储量计算公式,探索出一种专属于喀斯特地区土壤有机碳储量的估算方法,结果表明:不同土层深度和土壤类型下土壤有机碳含量存在明显差异,土壤有机碳含量随着土层深度的增加而逐渐减小,不同土属的有机碳含量减小的幅度有所差异,不同坡位和坡向的有机碳含量大小为:阳坡>阴坡,坡中上部>坡顶>坡中>坡中下坡>坡底,不同土地利用方式下土壤有机碳含量大小顺序为:林地>灌草地>旱地>水田;土壤有机碳含量与坡度、海拔、岩石裸露率均呈极显著正相关关系,与土层厚度、土壤容重呈显著负相关;喀斯特地区土壤异质性较大,不同修正指标对土壤有机碳储量估算的影响程度为:土壤厚度>岩石裸露率>石砾含量>土壤有机碳含量>土壤容重;通过修正后的计算公式估算出普定后寨河小流域表层 20 cm 土壤有机碳密度区间为 3.53—5.44 kg/m^2,平均值为:1.24 kg/m^2,100 cm 土壤有机碳密度区间为 4.44—14.50 kg/m^2,平均值为 12.12 kg/m^2,土壤有机碳储量为 5.39×10^5 t。
关键词:优化指标;影响因素;土壤有机碳储量;小流域;喀斯特

Study on spatial heterogeneity and reserve estimation of soil organic carbon in a small karst catchment

ZHANG Zhenming[1,2], ZHOU Yunchao[1,2,3,*], TIAN Xiao[1,2],HUANG Xianfei[1,2]
1 *Guizhou Institute for Forest Resources & Environment*, *Guizhou University*, *Guiyang* 550025, *China*
2 *College of Forestry*, *Guizhou University*, *Guiyang* 550025, *China*
3 *Puding Karst Ecosystem Research Station*, *Chinese Academy of Sciences*, *Anshun* 562100, *China*

Abstract: Using a grid-based sampling method, 2755 soil profiles consisting of 23536 soil samples were sampled and analyzed to study the spatial distribution of soil organic carbon (SOC) in the karst basin of Guizhou Province. Further, we established an estimation method of SOC stock exclusively for karst after correcting for soil distribution area, particle content, percentage of exposed rock, and soil thickness, and optimizing the calculation formula. The results showed that there were obvious differences in the SOC content of different soil types and at different soil depths. The content of SOC decreased with an increase in soil depth, but the extent of the decrease differed in soils of different types. The content of SOC in soils on shady slopes was higher than that in soils on sunny slopes. The content of SOC at different slope positions decreased in the following order: upper-middle, top, middle, lower-middle, and bottom. There was extensive SOC

基金项目:国家重大科学研究计划项目(2013CB956702);百层次人才计划【黔科合人才(2015)4022 号】贵州省基础研究项目黔科合[J]字 2014-2002-03
收稿日期:2016-09-14;　　**网络出版日期**:2017-07-12
*通讯作者 Corresponding author.E-mail: yc409@163.com

heterogeneity in the karst area. The order of SOC content under different land use patterns was as follows: woodland > shrub grassland > dry land > paddy field. SOC content showed a very significant positive correlation with slope, elevation, and percentage of exposed rock, and a significant negative correlation with soil thickness and soil bulk density. There was a large spatial variability in SOC in the karst area, with the influences of different indicators for SOC reserve estimation being as follows: soil thickness > percentage of exposed rock > particle content > content of SOC > soil bulk density. Using the revised formula to make estimations, the SOC density of the surface 20 cm of soil in a small watershed of the Houzhai River catchment in Pudin was 3.53—5.44 kg/m^2, with an average value of 1.24 kg/m^2. The SOC of the surface 100 cm of soil was 4.44—14.50 kg/m^2, with an average value of 12.12 kg/m^2, and the SOC storage was 5.39 × 10^5 t.

Key Words: optimization index; influence factor; soil organic carbon storage; small watershed; karst

土壤是陆地生态系统中最大且最为活跃的碳库,是全球碳循环和气候变化研究的核心内容,其碳源/汇功能在调节碳平衡、减缓温室气体体积上升方面具有不可替代的作用[1]。土壤中碳库微小的变化都会对全球气候产生很大的影响,那么准确估算土壤有机碳储量显得极其的重要,如何科学、准确地估算土壤中有机碳储量,是当前碳循环研究的重点和难点[2-3]。目前,学术界许多学者在全球[4-5]、国家[6]和区域等尺度上[7-8]对土壤有机碳储量的估算开展了大量研究,但在同一尺度不同研究结果之间存在很大差异,甚至是同一种方法和同一个研究区域的结果也相差甚远,这些研究采用的数据源、样本大小、采样深度和估算方法的不同是导致估算结果差异的主要原因[9],同时土壤有机碳含量空间分布存在较大变异性,样点数不够和图件比例尺不同,使得土壤剖面代表性往往不够,导致估算结果不准确[10-11]。因此,大量的采样分析和估算过程中相关指标的取值,对其估算结果的可靠性起着至关重要的作用。

喀斯特生态系统是受特殊地质背景制约的生态系统,其地形和地貌条件、水热条件、植被的立地条件以及土壤的发育条件等都不同于非喀斯特地区[12],因而具有不同的土壤碳循环特征[13-14]。认识喀斯特地区土壤碳储量是评估我国陆地土壤生态系统碳汇能力不可或缺的内容[15],喀斯特地区由于其特殊的地质和气候条件造成该地区环境容量小,抗干扰能力弱,稳定性低,自我调整能力差,受干扰后恢复速度慢、难度大。加之喀斯特地区土壤环境具有基岩出露,土壤存量少、分布不连续、微地貌复杂多样等基本特征,导致喀斯特土壤有机碳储量的计算也有许多不确定的因素[16]。目前,学术界在估算喀斯特地区土壤有机碳储量时,有少数学者关注了岩石裸露率和土层厚度等指标[17-18],但仍未考虑影响土壤有机碳储量的石砾含量和估算中各指标影响程度,为此本研究通过探讨高原型喀斯特小流域内土壤分布面积、石砾含量、岩石裸露率、土层厚度、土壤容重及土壤有机碳含量等指标的空间变异性,用土壤类型法对传统公式进行修正土壤有机碳密度及储量的计算公式,提出基于"土壤类型法"适宜的计算模式,以期为准确估算高原型喀斯特小流域土壤有机碳储量的研究提供科技支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区贵州省普定县后寨河小流域属高原型喀斯特小流域,覆盖该县城关镇、马官镇和白岩镇等地,流域面积 75 km^2,经纬度在 105°40′43″—105°48′2″E,26°12′29″—26°17′15″N 之间,海拔在 1223.4—1567.4 m 之间,气压在 80610—88380 pa 之间。年均气温为 15.3℃,年均降雨量为 1170.9 mm 以上,年蒸发量 920 mm。土壤主要是石灰岩和白云岩发育的石灰土、黄壤和水稻土,土壤质地粘重且抗腐蚀性差。植被主要有柏木(*Cupressus funebris*)、响叶杨(*Populus Adenopoda*)、香椿(*Toona sinensis*)、砂梨(*Pyrus pyrifolia* Burm Nakai)等;农作物主要有水稻(*Oryzasativa Oryzaglaberrima*)、玉米(*Zea mays*)、大豆(*Glycine max*)、向日葵(*Helianthus annuus*)、红薯(*Ipomoea batatas*)等,农作物种植方式为玉米、大豆及水稻、向日葵轮作,套种红薯。

1.2 试验设计

1.2.1 样点布置

利用地理信息系统 ArcGIS 9.3 软件平台,根据网格法原理在 1:10000 的研究区地形图上布置空间分布网格,网格实地大小为 0.15×0.15 km^2,在网格中心设置采样点,理论采样点为 3333 个,因有些样点位于河流、公路、住宅等处,实际样点为 2755 个,各采样点对应位置和植被类型情况,见图 1。在开展野外土壤样品采集及本底信息调查过程中,利用手持 GPS、罗盘仪和样点分布地形图进行采样点定位。

1.2.2 样品采集

在每个采样点处挖掘土壤剖面,通过分层带状取样采集土壤样品。土壤样品采集采用土壤剖面自下而上分层取样法。土壤剖面挖掘深度≤100 cm,土层浅挖至基岩或母质,深则挖至 100 cm,按 0—5,5—10,10—15,15—20,20—30,30—40,40—50,50—60,60—70,70—80,80—90,90—100 cm 分层,共 1—12 层。每个采样点需记录本底信息,并测定土壤容重、土壤厚度、岩石裸露率等指标。

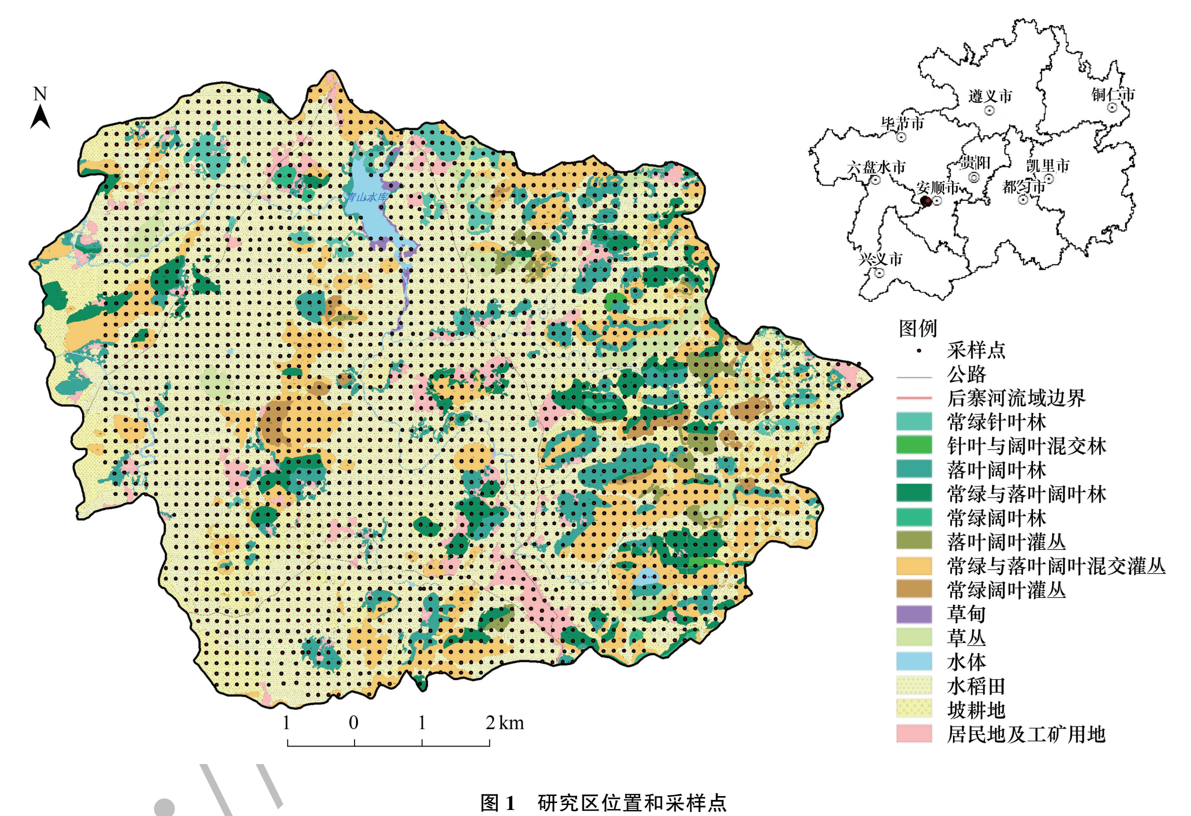


图 1　研究区位置和采样点

Fig.1　Location of the studied area and sampling sites

1.3 样品处理及测定分析

首先风干处理野外采集的土壤样品,再研磨制备试验测定所需样品。土壤有机碳用重铬酸钾-硫酸氧化法测定[19];土壤分布面积采用遥感数据验证和实地踏查相结合的方法统计;土壤容重用环刀法沿土壤剖面自上而下分层测定;土壤厚度用插钎法按小生境类型分别测定,铁钎长度为 60 cm 和 120 cm 两种,适用于测定不同深度的土体,测定 8—10 个点土层厚度的平均值表示;岩石裸露率用样线法测定,通过样点范围内植被覆盖面积百分比和岩石出露面积百分比表示;石砾含量采用大于 2 mm 的石砾所占的体积百分比表示。

1.4 数据分析

利用获取的 2755 个采样点数据进行分析,土壤按土属分类,流域内共有 3 大土类(图 2),即石灰土、水稻土和黄壤,包括 9 个土属,其中,黄泥土 457 个、黑色石灰土 613 个、黄色石灰土 397 个、大土泥 129 个、小土泥 439 个、白大土泥 125 个、白沙土 106 个、大泥田 185 个、黄泥田 304 个。试验数据利用 SPSS 19.0、Excel 2013

和 ArcGIS 9.3 软件平台完成。

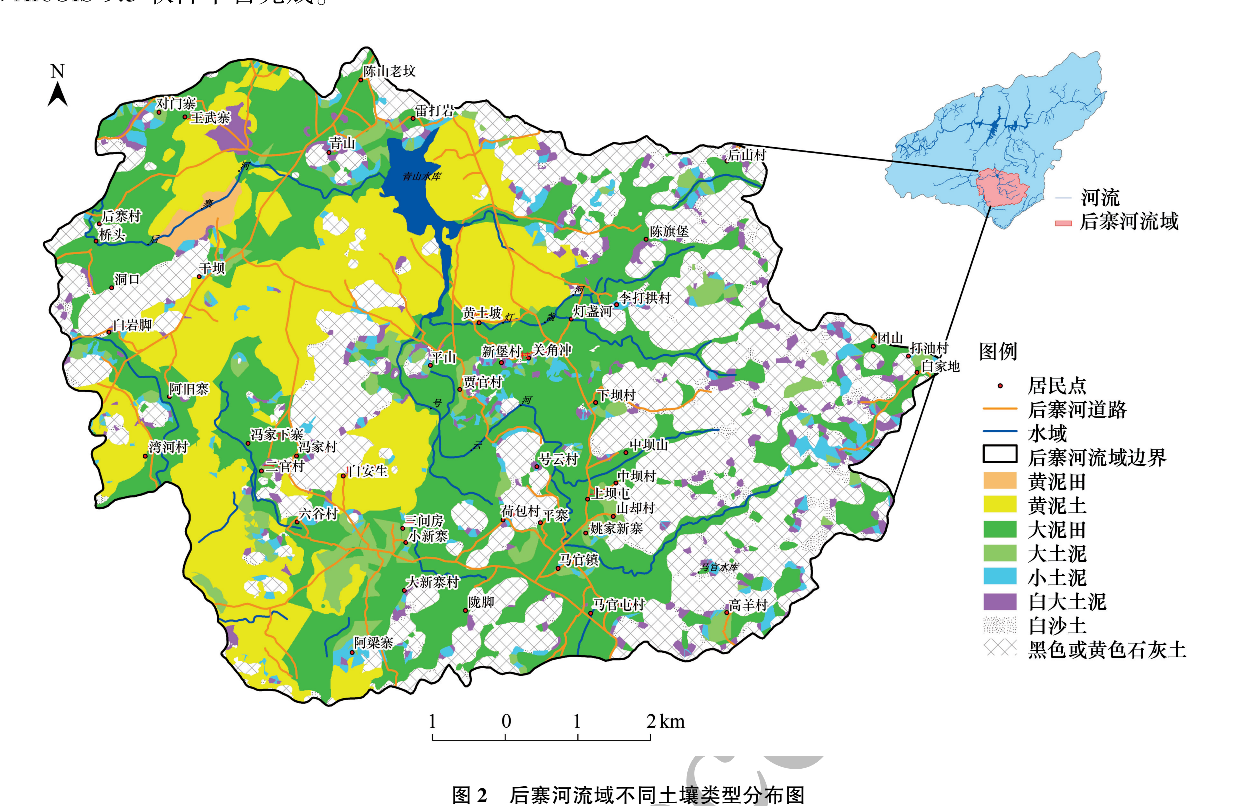


图 2 后寨河流域不同土壤类型分布图

Fig.2 Distribution map of different soil types of Houzhai River

1.5 土壤有机碳储量计算及公式优化

①常用计算公式

$$\bar{C} = \frac{\sum_{i=1}^{n} C_i \times H_i}{\sum H_i}, \quad C = \sum_{j=1}^{n} \overline{C_j} \times 10 \div 1.724 \times \rho \times S \times \frac{2000}{3} \times \sum H_j \times 10^{-2} \tag{1}$$

公式(1)引自潘根兴等[20]研究论文中碳库的估算方法公式,式中 C_i 为第 i 层土壤类型的有机质含量(%);H_i 为第 i 层土壤厚度(cm);$\overline{Cj}$ 为第 j 个土种的加权平均有机质含量(%);C 为碳库(kg);ρ 为土壤容重(g/cm³);S 是第 j 种土属的分布面积(hm²);$\frac{2000}{3}$ 是换算成平方米的系数;10^{-2} 为单位转换系数。

$$C_j = 0.58 S_j H_j O_j W_j \tag{2}$$

公式(2)引自王绍强等[21]研究论文中碳库的估算方法公式,式中 j 为土壤类型, C_j 为第 j 种土属土壤有机碳储量(t);S_j 为第 j 种土壤类型分布面积(hm²);H_j 为第 j 种土壤类型的平均厚度(cm);O_j 为第 j 种土壤类型的平均有机质含量(%);W_j 为 j 种土壤类型的平均容重(g/cm³)。

$$\mathrm{SOC}d_j = c_j \times h_j \times w_j \div 10, \quad SOC_j = SOCd_j \times s_j \tag{3}$$

公式(3)引自梁二等[22]研究论文中土壤有机碳密度的估算方法公式,式中 j 为某土壤类型, SOCD_j 为第 j 种土壤类型有机碳密度(kg/m²);c_j 为第 j 种土壤有机碳含量(%);h_j 为第 j 种土壤类型的平均厚度(cm);W_j 为 j 种土壤类型的平均容重(g/cm³);soc_j 为研究区域土壤有机碳总储量(t);s_j 是第 j 种土属的土壤分布面积(km²)。

以上三组计算公式均用于土壤有机碳储量估算,虽表达形式不同,但万变不离其宗,都离不开土壤有机碳含量、土壤容重、土壤厚度和土壤分布面积 4 大指标。公式(1)考虑了不同土类,但土壤容重取均值

1.4 g/cm³;公式(2)均用平均值进行计算,仅表达某类土壤有机碳储量;公式(3)考虑了分层计算土壤有机碳含量,也仅能表达某类土壤有机碳储量。喀斯特地区土壤有机碳含量、土壤容重、土壤厚度等指标变异性较大,且土壤种类较多,若用“土壤类型法”估算喀斯特地区土壤有机碳储量,需对以上公式进行优化。

②初次优化计算公式

考虑到喀斯特地区土壤种类较多,用“土壤类型法”进行估算;且土壤有机碳含量、土壤容重和土壤厚度等指标变异性较大,需分层计算土壤有机碳密度。将土壤剖面划分为1—12层次,通过相应层次土壤有机碳含量、土壤容重和土壤厚度值分层计算各层次土壤有机碳密度,从而得到普定后寨河小流域土壤有机碳密度空间特征值。再利用土壤有机碳密度和各类土壤分布面积分层计算有机碳储量,进而得到研究区土壤有机碳总储量。因此,以上土壤有机碳密度及其储量计算公式可优化为公式Ⅰ。

$$\mathrm{SOCD}_{i,j} = C_{soc_{i,j}} \times \rho_{i,j} \times T_{i,j} \times 10^{-2}\ ,\ \mathrm{SOCS} = \sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}\mathrm{SOCD}_{i,j} \times S_j \times 10^3 \qquad (4)$$

公式(4)中, $\mathrm{SOCD}_{i,j}$ 为第 j 种土属第 i 层的土壤有机碳密度(kg/m²); $C_{soc_{i,j}}$ 为第 j 种土属第 i 层的土壤有机碳含量(g/kg); $\rho_{i,j}$ 是第 j 种土属第 i 层的土壤容重(g/cm³); $T_{i,j}$ 是第 j 种土属第 i 层的土壤的厚度(cm); 10^{-2}为单位转换系数。SOCS 为研究区域土壤有机碳总储量(t); S_j 是第 j 种土属的土壤分布面积(km²); 10^3为单位转换系数。

③再次优化计算公式

为了消除喀斯特地区岩石部分带来的估算误差,修正土壤有机碳储量估算结果,使之更接近真实值,特以石砾含量、岩石裸露率进行修正,土壤有机碳密度及其储量计算公式Ⅰ可再次优化为公式Ⅱ。

$$\mathrm{SOCD}_{i,j} = C_{soc_{i,j}} \times \rho_{i,j} \times T_{i,j} \times 10^{-2}\ ,$$
$$\mathrm{SOCS} = \sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}\mathrm{SOCD}_{i,j} \times S_j \times (1-\delta_j) \times (1-G_j) \times 10^3 \qquad (5)$$

公式(5)中, δ_j 表示第 j 种土属分区的岩石裸露率(%), G_j 为第 j 种土属分区的大于2 mm的石砾所占的体积百分比(%),其余与公式(4)一致。通过对常见计算公式两次优化,公式Ⅱ考虑了喀斯特地区相关指标变异性较大的问题,属于喀斯特地区土壤有机碳储量估算的专用计算公式。

2　结果与分析

2.1　土壤相关指标统计分析

2.1.1　土壤面积、岩石裸露率、石砾含量、土壤厚度分布特征

采用遥感数据验证和实地踏勘相结合的方法,对不同土属进行归类分区,各分区交错分布于流域内,每个土属分区面积差异较大(表1),其中,黑色石灰土面积分布最大为13.79 km²,白沙土面积最小为2.38 km²,不同土属面积分布大小为:黑色石灰土>黄泥土>大泥田>小土泥>黄色石灰土>黄泥田>大土泥>白大土泥>白沙土。黑色石灰土区和黄色石灰土区一般位于峰丛上,二者相互渗透,用二者采样点数量权重区分,换算得到黑色石灰土区和黄色石灰土区面积分别为13.79 km²和8.93 km²。

表1　不同土属相关指标描述

Table 1　Description of different soil and related indexes

相关指标 Relevant index	黄泥土 Yellow clay	黑色石灰土 Rendzina	黄色石灰土 Yellow lime soil	大土泥 Large loam	小土泥 Small clay	白大土泥 White large loam	白沙土 White sand	大泥田 Large mud field soil	黄泥田 Yellow clayey soi
土壤分布面积 Soil distribution area/km²	12.88	13.79	8.93	3.39	9.87	2.81	2.38	12.59	7.53
岩石裸露率 Rock exposure/%	0	43.34±23.62	37.83±21.51	29.22±13.06	33.09±17.65	37.82±15.26	35.42±19.67	0	0
石砾含量 Stone content/%	1.02±0.13	21.56±10.56	19.68±7.07	9.26±5.06	12.32±4.29	15.42±7.21	17.01±9.43	0	0
土壤厚度 Soil t thickness/cm	100.00±13	20.00±11	32.00±16	85.00±27	58.00±33	64.00±33	33.00±25	87.00±23	93±17

流域内石灰土、水稻土和黄壤交错分布,空间异质性极高。在统计土壤分布面积时没有考虑岩石的存在,而石灰土区石漠化较为严重,大量岩石裸露于地表,将土被分割成大小不一的斑块,土被不连续,因此,土壤分布面积需用岩石裸露率进行修正。不同土属分区岩石裸露率存在一定的差异(表 1 和图 3),黑色石灰土区最大 43.34%,耕地中大土泥区最小 29.22%。黄泥土区、大泥田区和黄泥田区 3 大耕地区域几乎无裸露的岩石,岩石裸露率计为 0;石砾含量的分布特征和岩石裸露率的分布基本一致,大泥田和黄泥田的石砾含量为零,其他土壤类型的石砾含量大小为:黑色石灰土>黄色石灰土>白沙土>白大土泥>小土泥>大土泥>黄泥土。

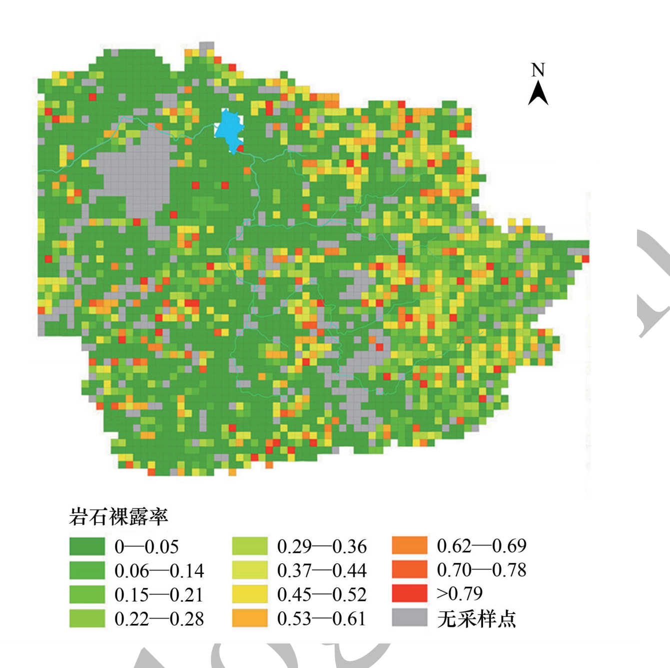


图 3 后寨河流域各采样点岩石裸露率分布图

Fig.3 Distribution of rock exposed rate at each sampling point of Hou Zai River

石灰土由碳酸盐岩发育而成,成土速率较慢,加之石质山区水土流失严重,峰丛上的土壤很薄,存在大量无土壤的石面或裸地,而洼地土壤相对较深厚。不同土属分区土壤厚度差异较大,黄泥土区土壤厚度大多超过 100 cm,而黑色石灰土区则约为 20 cm,部分区域甚至仅几厘米。黄泥土区为旱地,由第四纪黄黏土发育而成的黄壤较为深厚,而极少部分由砂页岩发育而成的黄壤较为浅薄,将其划归黄泥土区,因此黄泥土区土壤厚度计为 100 cm。大土泥区、小土泥区、白大土泥区、白沙土区也均为旱地,深浅不一,白沙土区较浅。大泥田区和黄泥田区为水田,流域上游大泥田区土壤厚度较浅,下游较深,黄泥田区土壤厚度大多超过 100 cm。黑色石灰土区和黄色石灰土区为自然土壤,分布在峰丛上,土壤厚度均较浅。

2.1.2 土壤容重

不同土壤类型下土壤容重分布特征见表 2:总体趋势上,黑色石灰土、黄色石灰土和小土泥容重随着土层加深而逐渐增大;黄泥土、大土泥、白大土泥、大泥田、黄泥田容重均随着土层加深而呈先增大后减小的趋势,大土泥和白大土泥在深层趋于稳定,黄泥土在深层又有增大的趋势;白沙土容重随着土层加深呈先减小后增大的趋势。黑色石灰土、黄色石灰土和小土泥底层容重最大,大泥田和黄泥田犁底层容重最大,其余土属容重均在 A 层与 B 层之间的过渡带最大。同一层位不同土属容重差异较大,在 15—20 cm 大泥田容重比黑色石灰土的大 0.16 g/cm^3。大泥田犁底层容重最大值为 1.44 g/cm^3,黑色石灰土表层容重最小值为 0.94 g/cm^3。不同土壤深度下各土壤类型土壤容重差异性显著,0—5 cm 深度下黄泥田土壤容重最大,显著高于其他 8 种土壤类型;5—10 cm 深度下黑手石灰土土壤容重最大,显著高于黄色石灰土、黄泥土、大土泥、白大土泥、小土泥、白沙土;10—15 cm 深度下黄泥田土壤容重最大,显著高于石灰土、黄泥土、大土泥、白大土泥、小土泥、白沙土;15—20 cm 深度下表现为黄泥田土壤容重最大,显著高于石灰土、黄泥土、白大土泥;20—70 cm 深度下均表现为大泥田土壤容重最大,70—100 cm 土壤深度下黑色石灰土土壤容重最大,与其他土壤类型有不同程度的显著性差异。

2.1.3 土壤有机碳含量

为了对小流域土壤有机碳含量的统计学特征及内部结构有一个初步的了解(表 3),对 23536 个样本的数据进行常规统计分析。流域内土壤样品的有机碳平均含量为 16.40 g/kg,变幅为 0.13—128.74 g/kg,极差为 128.61 g/kg,范围较宽,最大值是最小值的 990.31 倍。表层土壤(0—20 cm)有机碳平均含量为 25.07 g/kg,最小值仅为 1.61 g/kg,而最大值为 119.11 g/kg,极差范围为 117.50 g/kg,具有高度变异性。剖面土壤有机碳平均含量为 20.71 g/kg,变幅为 1.35—119.11 g/kg。分土层看,0—5 cm 土层土壤有机碳平均含量最高,为 29.66

g/kg,5—10 cm 土层次之,为 25.77 g/kg,随着土层加深,土壤有机碳平均含量减小,90—100 cm 土层达到最小,为 5.25 g/kg。各土层平均值大于中数,且两者的差值随土层加深逐渐减小。标准差和变异系数表示样本的变异程度。各土层土壤有机碳含量变异性较大,变异系数变化范围为 52.68%—75.28%,在 10%—100%之间,呈中等强度变异。

表 2　不同土属中土壤容重平均值(标准差)/(g/cm^3)

Table 2　Soil bulk density of different soil genus

土壤类型 Soil type	0—5 cm	5—10 cm	10—15 cm	15—20 cm	20—30 cm	30—40 cm
黑色石灰土 Rendzina	1.22(0.009)D	1.28(0.009)E	1.15(0.017)A	1.20(0.037)A	1.30(0.037)A	1.37(0.018)BC
黄色石灰土 Yellow lime soil	1.19(0.006)C	1.24(0.007)D	1.20(0.020)A	1.25(0.036)A	1.29(0.057)A	1.35(0.033)A
黄泥土 Yellow clay	1.19(0.015)CD	1.21(0.015)CD	1.21(0.009)D	1.28(0.041)A	1.33(0.009)A	1.32(0.017)D
黄泥田 Yellow clayey soil	1.27(0.020)E	1.28(0.017)E	1.29(0.023)BC	1.37(0.020) B	1.49(0.059)B	1.45(0.029)BA
大泥田 Large mud field soil	1.22(0.024)D	1.26(0.025)DE	1.25(0.019)B	1.36(0.028)AB	1.52(0.029)BA	1.46(0.025)B
大土泥 Large loam	1.13(0.017)B	1.18(0.017)C	1.27(0.035)A	1.36(0.018)BC	1.43(0.059)B	1.42(0.010)B
白大土泥 White large loam	1.02(0.030)A	1.04(0.035)A	1.19(0.016)CD	1.26(0.021)A	1.34(0.018)DE	1.35(0.033)AB
小土泥 Small clay	1.05(0.017)AB	1.11(0.016)AB	1.26(0.020)DE	1.34(0.037)AB	1.40(0.018)B	1.39(0.015)B
白沙土 White sand	1.10(0.028)B	1.14(0.023)BC	1.27(0.020)E	1.29(0.043)AB	1.39(0.015)B	1.42(0.054)B

土壤类型 Soil type	40—50 cm	50—60 cm	60—70 cm	70—80 cm	80—90 cm	90—100 cm
黑色石灰土 Rendzina	1.38(0.007)B	1.39(0.029)AB	1.40(0.054)B	1.44(0.054)B	1.46(0.029)BA	1.44(0.077)B
黄色石灰土 Yellow lime soil	1.37(0.028)AB	1.38(0.008)A	1.40(0.010)B	1.39(0.010)B	1.35(0.049)AB	1.32(0.009)A
黄泥土 Yellow clay	1.33(0.092)A	1.32(0.034)A	1.32(0.029)A	1.31(0.021)CD	1.29(0.057)A	1.28(0.030)A
黄泥田 Yellow clayey soil	1.43(0.020)AB	1.43(0.054)B	1.41(0.054)B	1.39(0.022)B	1.39(0.020) B	1.35(0.033)AB
大泥田 Large mud field soil	1.48(0.059)B	1.47(0.059)B	1.45(0.059)B	1.42(0.054)B	1.42(0.054)B	1.43(0.027)B
大土泥 Large loam	1.43(0.025)B	1.45(0.020)AB	1.44(0.027)B	1.42(0.054)B	1.44(0.077)B	1.44(0.026)A
白大土泥 White large loam	1.37(0.019)B	1.36(0.028)AB	1.39(0.007)B	1.38(0.022)B	1.36(0.049)AB	1.26 (0.021)A
小土泥 Small clay	1.39(0.007)B	1.41(0.054)B	1.38(0.028)AB	1.37(0.019)B	1.38(0.028)AB	1.37(0.020) B
白沙土 White sand	1.40(0.007)B	1.43(0.025)B	1.43(0.010)B	1.42(0.054)B	1.38(0.029)AB	1.32(0.052)AB

同列不同大写字母表示差异显著(P<0.05)

表 3　土壤有机碳含量描述性统计特征

Table 3　Descriptive statistics of soil organic carbon content

统计量 Statistic	0—5 cm	5—10 cm	10—15 cm	15—20 cm	20—30 cm	30—40 cm	40—50 cm
平均 Mean/(g/kg)	29.66	25.77	22.26	18.84	14.60	10.96	8.96
最小值 Min /(g/kg))	1.04	0.80	0.53	0.97	0.43	0.42	0.23
最大值 Max/(g/kg)	128.18	128.74	98.22	84.14	77.05	81.17	62.06
中位数 Median /(g/kg)	25.21	22.34	19.83	16.79	12.57	9.25	7.69
标准差 S.D. /(g/kg)	15.91	13.57	12.28	11.40	9.59	7.43	6.14
变异系数 CV/%	53.63	52.68	55.16	60.50	65.68	67.78	68.55

统计量 Statistic	50—60 cm	60—70 cm	70—80 cm	80—90 cm	90—100 cm	0—20 cm	0—100 cm
平均 Mean/(g/kg)	7.57	6.80	6.17	5.64	5.25	25.07	20.71
最小值 Min /(g/kg))	0.23	0.15	0.21	0.13	0.13	1.61	1.35
最大值 Max/(g/kg)	56.63	52.23	51.50	29.68	31.23	119.11	119.11
中位数 Median /(g/kg)	6.17	5.56	4.83	4.34	4.22	21.40	15.99
标准差 S.D. /(g/kg)	5.22	4.83	4.64	4.05	3.95	13.93	14.90
变异系数 CV/%	68.94	71.05	75.28	71.79	75.23	55.56	71.96

为进一步的分析不同土壤类型下有机碳含量的变化规律(图 4):不同土属有机碳含量均随着土层加深而逐渐减小,不同土属减小的幅度有所差异。在 0—50 cm 土层范围内,土壤有机碳含量呈线性关系减小;在

50—100 cm 土层范围内,土壤有机碳含量变化不大。同一层位不同土属有机碳含量差异较大,黑色石灰土表层有机碳含量是黄泥土的 2.61 倍。总体而言,黑色石灰土有机碳含量最大,黄泥土有机碳含量最小;表层土壤有机碳含量大于深层土壤有机碳含量,黑色石灰土和黄色石灰土两种峰丛林地自然土壤的有机碳含量大于其余 7 种耕作土壤的有机碳含量,且峰丛中上部的黑色石灰土有机碳含量大于中下部的黄色石灰土有机碳含量。对不同土壤类型下的土壤有机碳含量(0—100 cm 土层)拟合不同函数为:黑色石灰土、黄色石灰土、黄泥土、黄泥田为对数方程,方程分别 $y=-17.212\ln(x)+48.897$($R^2=0.9415$)、$y=-12.723\ln(x)+37.838$($R^2=0.9852$)、$y=-6.6206\ln(x)+20.832$($R^2=0.9814$)、$y=-9.4901\ln(x)+26.713$($R^2=0.9332$);白沙土、白大土泥、大泥田指数函数 $y=39.226e-0.1807x$($R^2=0.9708$)、$y=29.939e-0.1315x$($R^2=0.9602$)、$y=31.926e-0.1502x$($R^2=0.9438$);小土泥和大土泥为多项式,其函数分别为 $y=0.151x^2-3.7972x+29.74$($R^2=0.9981$)、$y=0.1543x^2-3.7127x+28.466$($R^2=0.996$)。

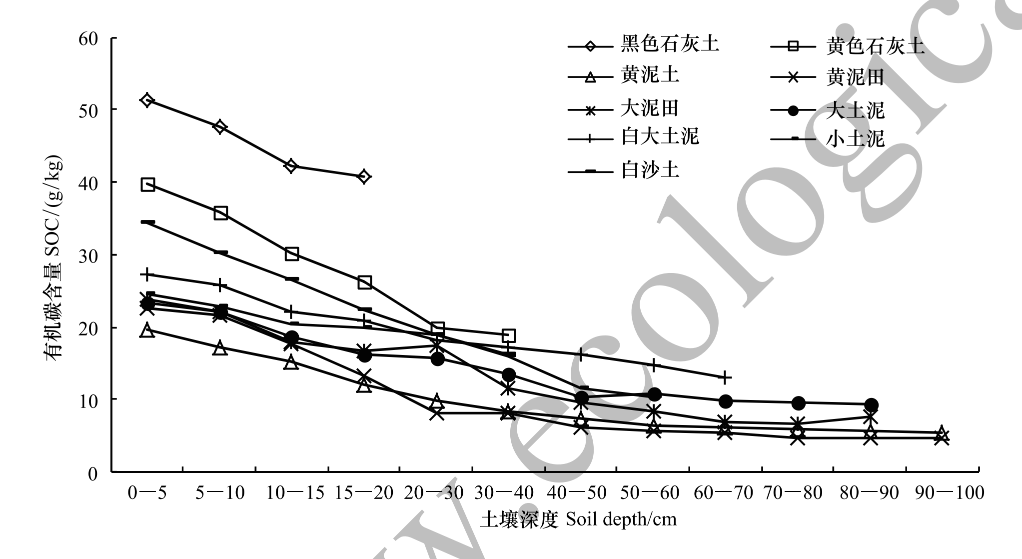


图 4 不同土属土壤有机碳含量

Fig.4 Content of soil organic carbon of different soil genus

坡向和坡位的变化会对土壤有机碳含量产生明显影响(表 4),不同坡向间有机碳含量大小均表现为阳坡大于阴坡,阴坡的不同土壤深度间表现为显著差异。而不同坡位表现为:表层土壤(0—20 cm)有机碳平均含量大于整个剖面土壤(0—100 cm)平均含量,坡中上部表层土壤有机碳含量最高为 39.83 g/kg,坡底最低为 19.21 g/kg,上坡是坡底的 2.07 倍,除坡中上部外其他坡位间不同土壤深度土壤有机碳含量呈差异性显著。而整个剖面中(0—100 cm),坡中上部最高为 37.84 g/kg,坡底最低为 12.77 g/kg,坡中上部是坡底的 2.96 倍。表层土壤有机碳含量与剖面土壤有机碳含量差值较小,变幅为 1.99—6.44 g/kg,坡中上相差最小,坡底相差最大。表层和整个剖面有机碳大小都表现为:坡中上部>坡顶>坡中>坡中下坡>坡底。

不同人为因素对土壤有机碳含量产生明显影响(表 4),不同土地利用方式下表层土壤(0—20 cm)有机碳平均含量高于剖面土壤(0—100 cm)有机碳平均含量,土壤有机碳含量大小顺序为:林地>灌草地>旱地>水田。表层中(0—20 cm),林地最高为 33.83 g/kg,水田最低为 20.51 g/kg,两者相差 13.32 g/kg。林地剖面土壤有机碳含量为 30.80 g/kg,水田为 12.92 g/kg,林地是水田的 2.38 倍。水田表层土壤有机碳含量与剖面土壤有机碳含量差值最大,为 7.59 g/kg,灌草地最小,为 2.41 g/kg。旱地和灌草地不同深度的土壤有机碳含量呈差异性显著,林地和水田间相关性不明显。

影响土壤有机碳含量的因素众多,为深入分析坡度、海拔、土层厚度、石砾含量、容重、岩石裸露率与土壤有机碳含量之间的相关关系,利用 SPSS 软件进行相关分析结果(表 5)表明:表层土壤有机碳含量与坡度、海拔、岩石裸露率均呈极显著正相关关系,相关系数 r 分别为 0.865,0.993 和 0.880;与土层厚度呈极显著负相关关系,相关系数 r 为−0.910;容重呈显著负相关关系,相关系数 r 为−0.832;与石砾含量的显著正相关,相关系

数为 0.510。剖面土壤有机碳含量与坡度、海拔、岩石裸露率均呈极显著正相关关系,相关系数 r 分别为 0.994,0.971 和 0.959;与土层厚度呈极显著负相关关系,相关系数 r 为-0.932;与容重呈显负相关关系,相关系数 r 为和-0.790;与石砾含量的相关关系不显著。土壤厚度与海拔、容重量呈显著相关性,相关系数分别为-0.513、0.601。石砾含量与海拔呈、岩石裸露率呈正显著相关,与土壤厚度呈负显著相关;岩石裸露率与坡度、海拔正显著相关,与土壤厚度呈极显著负相关。

表 4　不同坡向、坡度、土地利用方式下土壤有机碳含量平均值(标准差)/(g/kg)

Table 4　Average value of soil organic carbon under different slope, slope and land use (standard deviation)

土壤 Soil	坡向 Slope direction		坡位 Slope position					土地利用方式 Land use pattern			
深度 Depth/cm	阴坡 Shady	阳坡 Sunny	坡底 Bottom of slope	坡中下部 Lower part of slope	坡中部 Central part of slope	坡中上部 Upper part of slope	坡顶 Top part of slope	旱地 Dry land	水田 Paddy field	灌草地 Shrub grassland	林地 Woodland
0—20	33.57 (1.14)B	37.12 (1.18)D	19.21 (1.16)C	26.23 (2.16)D	32.25 (1.14)C	39.83 (2.12)A	33.72 (2.45)B	22.78 (1.63)D	20.51 (1.12)D	31.86 (1.58)B	33.83 (1.87)A
0—100	25.18 (0.027)A	26.26 (0.92)D	12.77 (1.47)D	23.46 (1.01)C	28.89 (0.75)B	37.84 (1.84)A	29.78 (1.58)C	20.22 (1.36)C	12.92 (1.52)D	29.45 (1.03)A	30.80 (1.53)A

同列不同大写字母表示差异显著(P<0.05)

表 5　土壤有机碳影响与各影响因素的相关分析

Table 5　Correlation analysis of soil organic carbon and influencing factors

指标 Index	坡度 Slope direction	海拔 Altitude	土层厚度 Soil thickness	容重 Bulk density	石砾含量 Stone content	岩石裸露率 Rock exposure	有机碳含量(0—20 cm) Organic carbon content	有机碳含量(0—100 cm) Organic carbon content)
坡度 Slope direction	1.000							
海拔 Altitude	0.632	1.000						
土层厚度 Soil thickness	0.123	-0.513*	1.000					
容重 Bulk density	0.432	0.243	0.601*	1.000				
石砾含量 Stone content	0.127	0.515*	-0.706*	0.423	1.000			
岩石裸露率 Rock exposure	0.483*	0.312*	-0.816**	0.456	0.643*	1.000		
表层有机碳含量(0—20 cm) Organic carbon content	0.865**	0.993**	-0.910**	-0.832*	0.510*	0.880**	1.000	
剖面有机碳含量(0—100 cm) Organic carbon content	0.994**	0.971**	-0.932**	-0.790*	0.262	0.959**	0.512*	1.000

* * 表示在置信度(双测)为 0.01 时,相关性是显著的; * 表示在置信度(双测)为 0.05 时,相关性是显著的

2.2　有机碳储量估算的指标取值

用 2755 个采样点数据进行分析,得到了普定后寨河小流域土壤有机碳含量、土壤容重、土壤厚度、土壤分布面积和岩石裸露率等指标区间值(表 6)。在研究区,在 0—20 cm 范围内 5 cm 厚土壤有机碳密度区间为 0.21—3.43 kg/m^2;在 20—100 cm 范围内 10 cm 厚土壤有机碳密度区间为 0.16—4.21 kg/m^2;不同土属 20—100 cm 厚土壤有机碳密度区间为 5.14—19.32 kg/m^2。在 0—100 cm 范围内土壤容重区间为 0.94—1.44 g/cm^3。土壤厚度区间为 20—100 cm,若土壤厚度大于 100 cm 时计为 100 cm,研究区土壤平均厚度为 64 cm。喀斯特地区岩石裸露率区间为 29.22%—43.34%,石砾含量区间为 0—75.71%,可用于修正土壤分布面积。流域面积为 75 km^2,其中水域面积为 0.83 km^2,土壤面积为 74.17 km^2,但土壤面积包含岩石所占部分。由于研究区不同土属土壤有机碳含量、土壤容重及土壤厚度的差异较大,不同土属土壤分布面积差异较大,且石灰土分区岩石裸露率、石砾含量差异也较大,因此,在估算土壤有机碳储量时得利用各指标分类分层计算,再求出土壤有机碳总储量。

表 6 不同指标区间值

Table 6 Interval value of different index

指标 Index	单位 Company	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	备注 Remarks
SOC	kg/m²	0.21	3.43	1.24	5 cm 厚(0—20 cm)
		0.16	4.21	1.36	10 cm 厚(20—100 cm)
		5.14	19.32	12.12	20—100 cm 厚合计
ρ	g/cm³	0.94	1.44	1.20	
T	cm	20	100	64	>100 cm 时取 100 cm
δ	%	29.22	43.34	36.12	
G_j	%	0	75.71	7.71	大于 2 mm 的石砾所占的体积百分比(%)
S	km²	0.83(水域)	74.17(土壤)	75.00(合计)	土壤面积含岩石所占部分

SOC 表示有机碳密度;ρ 表示土壤容重;T 表示土壤深度;δ 表示岩石裸露率;G_j 表示大于 2 mm 的石砾含量百分比;S 表示土壤面积

2.3 土壤有机碳密度估算

在 0—20 cm 范围内不同土属分区 5 cm 厚土壤有机碳密度总体上随土层深度加深而逐渐减小。黑色石灰土有机碳密度最大,而黄泥土有机碳密度最小。在 20—100 cm 范围内不同土属分区 10 cm 厚土壤有机碳密度总体上随土层深度加深而逐渐减小,并在土壤深层逐渐趋于稳定。10 cm 厚土壤有机碳密度最大值是最小值 1.58 倍。表层 20 cm 厚土壤有机碳密度区间为 3.29—5.44 kg/m^2,100 cm 以内土壤有机碳密度区间为 4.44—14.50 kg/m^2(表 7)。

表 7 流域内不同土属有机碳密度空间分布特征值/(kg/m^2)

Table 7 Spatial distribution eigenvalue of soil organic carbon density of different soil genus in basin

土壤层次 Soil thickness/cm	黄泥土 Yellow clay	黑色石灰土 Rendzina	黄色石灰土 Yellow lime soil	大土泥 Large loam	小土泥 Small clay	白大土泥 White large loam	白沙土 White sand	大泥田 Large mud field soil	黄泥田 Yellow clayey soil
0—5	0.97	1.35	1.32	1.19	1.19	1.14	1.30	1.46	1.34
5—10	0.88	1.22	1.15	1.12	1.07	1.03	1.12	1.45	1.29
10—15	0.77	1.04	1.01	1.04	0.99	0.97	0.92	1.38	1.23
15—20	0.67	0.83	0.83	0.89	0.85	0.79	0.74	1.15	1.10
20—30	1.06	—	1.22	1.48	1.30	1.19	0.86	2.52	1.57
30—40	0.86	—	0.80	1.05	0.88	0.85	0.46	1.63	1.03
40—50	0.78	—	—	0.85	0.62	0.56	—	1.33	0.78
50—60	0.67	—	—	0.65	0.44	0.35	—	1.09	0.66
60—70	0.59	—	—	0.54	—	0.30	—	0.91	0.56
70—80	0.53	—	—	0.42	—	—	—	0.89	0.45
80—90	0.41	—	—	0.33	—	—	—	0.69	0.43
90—100	0.35	—	—	—	—	—	—	—	0.36
合计 Total	8.54	4.44	6.33	9.56	7.34	7.18	5.4	14.5	10.8

土壤有机碳密度与土壤厚度一一对应

2.4 土壤有机碳储量计算方法比较

不同土壤有机碳储量计算方法比较,见表 8:在土壤有机碳含量、土壤容重和土壤厚度的变异性,但不考虑岩石影响土壤面积的情况下,后寨河小流域土壤有机碳储量为 $SOCS_7 = 9.37\times10^5$ t。若土壤有机碳含量、土壤容重和土壤厚度分别取均值,而考虑其他指标的变异性时,后寨河小流域土壤有机碳储量分别为 $SOCS_4 = 9.61\times10^5$ t、$SOCS_5 = 9.28\times10^5$ t、$SOCS_6 = 8.53\times10^5$ t,$SOCS_6 < SOCS_5 < SOCS_4$(表 8),说明土壤有机碳含量、土壤容重和土壤厚度对估算土壤有机碳储量有不同程度的影响。

若假定土壤为 100 cm 深均质土壤,土壤容重取平均值 1.20 g/cm^3,$SOCS_1 > SOCS_2 > SOCS_3 = 1.8SOCS_7$,即随

着有机碳含量均值计算范围的加深,土壤有机碳储量在不断减小,且 $SOCS_3$ 是 $SOCS_7$(CK)的 1.8 倍。在未考虑岩石裸露率、石砾含量的情况下,后寨河小流域土壤有机碳储量为 $SOCS_7=9.37\times10^5$ t,但通过岩石裸露率、石砾含量修正后,土壤有机碳储量为 $SOCS_8=5.39\times10^5$ t,二者估算结果差异较大,在 75 km^2 的流域内尽然相差 3.98×10^5 t(表 8)。表明,岩石裸露率、石砾含量是影响喀斯特地区土壤有机碳储量估算结果准确性的重要因素。

表 8　不同取值和计算方式下土壤有机碳储量

Table 8　Storage of soil organic carbon of different value and calculation mode

方式 Mode	变异因素 Variation factor	不变因素 Invariant factor	计算方案 Calculation scheme	SOCS 储量值 Reserves value of SOCS(10^5) t
$SOCS_1$	-	Csoc 取 0—30 cm 均值、ρ =1.20 g/cm^3、T=100 cm、S	面积权重	20.86
$SOCS_2$	-	Csoc 取 0—50 cm 均值、ρ =1.20 g/cm^3、T=100 cm、S	面积权重	19.32
$SOCS_3$	-	Csoc 取 0—100 cm 均值、ρ =1.20 g/cm^3、T=100 cm、S	面积权重	17.05
$SOCS_4$	ρ、T	Csoc 取 0—100 cm 均值、S	分层+面积权重	9.61
$SOCS_5$	Csoc、T	ρ =1.20 g/cm^3(均值)、S	分层+面积权重	9.28
$SOCS_6$	Csoc、ρ	T=64 cm(均值)、S	分层+面积权重	8.53
$SOCS_7$(CK)	Csoc、ρ、T	S	分层+面积权重	9.37
$SOCS_8$	Csoc、G、ρ、T、S	-	分层+面积权重,并以 δ、G 修正面积	5.39

3　讨论

土壤中有机碳含量是土壤碳库的重要组成部分,不同地点的土壤有机碳都会受到自然和人为措施以及它们相互作用的影响[23-24]。喀斯特地区土体空间分布极其复杂,土壤种类较多,零星交错分布,土被不连续,裸露岩石将土体分割成大小不一的斑块,导致了不同土壤类型下土壤有机碳含量差异较大[25]。喀斯特二元空间异质性导致了土壤有机碳含量、土壤厚度、石砾含量等指标的变异性,这些指标却决定了土壤有机碳的含量及分布特征。有关学者研究发现,喀斯特土壤有机碳和土壤容重存在显著的负指数相关[26],本研究结果也表明,土壤有机碳与土壤容重呈显著负相关,最终让土壤有机碳和容重在空间分布上存在相反的分布趋势。土壤有机碳与岩石出露率呈极显著正相关,而与土层厚度呈极显著负相关,这与 Zhang 等研究结果一致[27]。喀斯特地区多为石槽、石缝,一般土层浅薄,有机碳集中在少量的土壤中,同时,由于石漠化作用致使大量表土流失、岩石裸露、土被不连续、生境复杂化,加剧了土壤有机碳的流失[28]。由人类活动及自然因素的变化引起的土壤属性的差异,是土壤碳库和碳循环最直接的影响因子[29],在此基础上,本文也研究了地形因子(坡度、坡向)及土地利用方式对土壤有机碳的影响,结果显示自然和人为因素的影响下土壤有机碳储差异较大。

迄今为止,全球土壤有机碳储量存在很大争议,碳源/汇的大小和位置存在极大不确定性,在全球碳平衡研究中,发现全球大气变化并不平衡,存在相当大量的碳失踪汇,约为 0.4—4 Gt[30]。早期对土壤有机碳库的估算是根据几十个或几百个土壤剖面资料,使用世界土壤地图估算的全球陆地生态系统土壤碳库碳在 1462—1548 Pg 之间[31];而中国的学者往往借助第二次土壤普查资料,利用地理信息系统相关软件将一定比例的土壤图数字化,建立相关模型,然后利用 GIS 的空间分析功能计算出中国陆地土壤有机碳储量处于 50.6—154.0 Pg 之间,虽然属同一数量级,但其最大值与最小值却相差 2 倍多[32]。这些研究结果都是利用有限的采样点对区域内未观测点进行估值,受样点密度、采样方法等影响,估算方法误差,当前学术界所用的土壤碳储量估算方法存在一定的不足,到底哪一种方法估算的结果更准确,暂时没有定论,其主要原因是土壤剖面代表性能不够强。而喀斯特区域土壤空间异质极高,利用少数代表剖面估算有机碳储量不能直接挪用到喀斯特区域,为此,本研究共用 2755 个土壤剖面,23536 个土壤样品,采样点数较多,具有详细的基础数据,能准

确的估算出土壤有机碳密度及储量，同时本研究合理修正碳储量的估算公式，建立了一套专门的喀斯特区域土壤碳储量估算方法。

岩石裸露率和土层厚度的变化对土壤有机碳转化的影响等，已成为人们非常关心和研究的热点，而对石砾含量的关注度欠佳，为了验证石砾含量对土壤有机碳储量估算结果的影响[33-34]。在充分考虑喀斯特地区土壤的空间异质性问题上，土壤容重取研究区平均值 1.20 g/cm^3，用潘根兴等的公式 A 估算后寨河小流域土壤有机碳储量为 $7.33×10^5$ t，比本研究优化的公式Ⅱ计算值大 $1.94×10^5$ t；用王绍强等公式 B 计算得 $7.63×10^5$ t，比本研究优化的公式Ⅱ计算值大 $2.24×10^5$ t，公式 A、B 均未考虑岩石裸露率及石砾含量，同样影响估算结果的准确性，造成这么大误差原因是喀斯特地区石砾含量不同和高岩石裸露所致。喀斯特地区多为白云岩石灰岩地区发育的土壤，其石砾含量和岩石裸露率高，基于岩石出露率、石砾含量校正来估算喀斯特地区土壤有机碳储量和碳密度时优于传统估算方法，更接近样区的实际值。

喀斯特地区土壤有机碳储量估算结果的准确性除了与估算方法有关，也与土壤有机碳含量、土壤容重、土壤厚度和土壤分布面积等指标的准确性有关。在土壤有机碳储量估算时，土壤有机碳含量、土壤容重和土壤厚度分别取均值，交替考虑其他指标的变异性时，有机碳储量变化范围 $8.53×10^5$—$9.61×10^5$ t（$SOCS_4$—$SOCS_6$），在考虑喀斯特土壤属性空间异质性时，还必须把土壤有机碳含量、土壤容重等指标的变异性，作为关键影响因子纳入采样方案以及碳储量估算方法。当考虑土壤有机碳含量、土壤容重和土壤厚度的变异性，不考虑岩石影响土壤面积的情况下，有机碳储量为 $9.37×10^5$ t（$SOCS_7$），在估算喀斯特碳储量和碳密度时应充分考虑岩石裸露率、土壤厚度、石砾含量，可以大大降低估算误差。这些指标都是土壤有机碳储量的重要影响因素，加上喀斯特地区土壤分布面积受裸露岩石、石砾含量的影响，所统计的土壤分布面积比实际面积大，需用岩石裸露率、石砾含量进行修正可以得到准确的计算结果为 $5.39×10^5$ t（$SOCS_8$）。各指标与准确的估算结果差异较大，$SOCS_4$ 比 $SOCS_7$ 大 $0.24×10^5$ t，$SOCS_5$ 比 $SOCS_7$ 小 $0.092×10^5$ t，$SOCS_6$ 比 $SOCS_7$ 大 $0.84×10^5$ t，$SOCS_8$ 比 $SOCS_7$ 小 $3.98×10^5$ t，表明这些指标对土壤有机碳储量的影响程度关系为土壤厚度>岩石裸露率>石砾含量>土壤有机碳含量>土壤容重。因此，在估算喀斯特地区土壤有机碳储量时应首先考虑土壤厚度、岩石裸露率和石砾含量三大因素，其次是土壤有机碳含量，最后是土壤容重。说明基于岩石出露率、石砾含量的校正的估算方法在估算喀斯特地区表层土壤有机碳储量时优于传统估算方法，更接近样区的实际值，尤其在估算喀斯特高岩石出露坡地表层有机碳储量时更具适用性，而传统估算方法并不适合估算喀斯特高裸岩坡地有机碳储量。

4 结论

（1）喀斯特地区土壤有机碳含量、土壤容重、土壤厚度、岩石裸露率等指标的空间变异性较大，估算土壤有机碳储量应考虑土壤的二元空间异质性，用“土壤类型法”估算时应以“垂直分层+水平分类”模式计算。

（2）岩石影响喀斯特地区土壤有机碳储量估算的准确度，应以岩石裸露率修正计算公式。修正后喀斯特地区土壤有机碳密度及储量的专属计算公式分别为 $SOCD_{i,j} = C_{soc_{i,j}} \times \rho_{i,j} \times T_{i,j} \times 10^{-2}$ 和 $SOCS = \sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n} SOCD_{i,j} \times S_j \times (1-\delta_j) \times (1-G_j) \times 10^3$。

（3）不同指标对喀斯特地区土壤有机碳储量估算的影响程度关系为土壤厚度>岩石裸露率>石砾含量>土壤有机碳含量>土壤容重。通过岩石裸露率、石砾含量修正后的计算公式，估算出普定后寨河小流域土壤有机碳储量为 $5.39×10^5$ t，其中表层 20 cm 土壤有机碳密度区间为 3.53—5.44 kg/m^2，平均值为：1.24 kg/m^2，100 cm 土壤有机碳密度区间为 4.44—14.50 kg/m^2，平均值为 12.12 kg/m^2。

参考文献（References）：

[1] 奚小环，杨忠芳，夏学齐，李敏. 基于多目标区域地球化学调查的中国土壤碳储量计算方法研究. 地学前缘，2009，16(1)：194-205.

[2] Lu X Q，Toda H，Ding F J，Fang S Z，Yang W X，Xu H G. Effect of vegetation types on chemical and biological properties of soils of karst

ecosystems. European Journal of Soil Biology, 2014, 61: 49-57.
[3] Ni J. Carbon storage in grasslands of China. Journal of Arid Environments, 2002, 50(2): 205-218.
[4] Deng L, Zhu G Y, Tang Z S, Shangguan Z P. Global patterns of the effects of land-use changes on soil carbon stocks. Global Ecology and Conservation, 2016, 5: 127-138.
[5] Gifford R M. The global carbon cycle: a viewpoint on the missing sink. Australian Journal of Plant Physiology, 1994, 21(1): 1-15.
[6] 常小峰, 汪诗平, 徐广平, 白玲. 土壤有机碳库的关键影响因素及其不确定性. 广西植物, 2013, 33(5): 710-716, 668-668.
[7] 刘京, 常庆瑞, 陈涛, 刘梦云, 齐雁冰. 陕西省土壤有机碳密度空间分布及储量估算. 土壤通报, 2012, 43(3): 656-661.
[8] 刘宪锋, 任志远, 林志慧. 基于 GIS 的陕西省土壤有机碳估算及其空间差异分析. 资源科学, 2012, 34(5): 911-918.
[9] Rodríguez-Murillo J C. Organic carbon content under different types of land use and soil in peninsular Spain. Biology and Fertility of Soils, 2001, 33(1): 53-61.
[10] 于沙沙, 窦森, 黄健, 杨靖民, 石瑛, 郑海辉. 吉林省耕层土壤有机碳储量及影响因素. 农业环境科学学报, 2014, 33(10): 1973-1980.
[11] 李俊超, 郭胜利, 党廷辉, 张彦军, 李娜娜. 黄土丘陵区不同退耕方式土壤有机碳密度的差异及其空间变化. 农业环境科学学报, 2014, 33(6): 1167-1173.
[12] Zheng H, Su Y R, He X Y, Hu L N, Wu J S, Huang D Y, Li L, Zhao C X. Modified method for estimating the organic carbon density of discontinuous soils in peak-karst regions in Southwest China. Environmental Earth Sciences, 2012, 67(6): 1743-1755.
[13] Chen X B, Zheng H, Zhang W, He X Y, Li L, Wu J S, Huang D Y, Su Y R. Effects of land cover on soil organic carbon stock in a karst landscape with discontinuous soil distribution. Journal of Mountain Science, 2014, 11(3): 774-781.
[14] Jones C, McConnell C, Coleman K, Cox P, Falloon P, Jenkinson D, Powlson D. Global climate change and soil carbon stocks; predictions from two contrasting models for the turnover of organic carbon in soil. Global Change Biology, 2005, 11(1): 154-166.
[15] VandenBygaart A J, Gregorich E G, Angers D A, Stoklas U F. Uncertainty analysis of soil organic carbon stock change in Canadian cropland from 1991 to 2001. Global Change Biology, 2004, 10(6): 983-994.
[16] 张信宝, 王世杰, 曹建华, 王克林, 孟天友, 白晓永. 西南喀斯特山地水土流失特点及有关石漠化的几个科学问题. 中国岩溶, 2010, 29(3): 274-279.
[17] Heilman J L, Litvak M E, McInnes K J, Kjelgaard J F, Kamps R H, Schwinning S. Water-storage capacity controls energy partitioning and water use in karst ecosystems on the Edwards Plateau, Texas. Ecohydrology, 2014, 7(1): 127-138.
[18] Zhou Y C, Wang S J, Lu H M, Xie L P, Xiao D A. Forest soil heterogeneity and soil sampling protocols on limestone outctops: example from SW China. Acta Carsologica, 2010, 39(1): 115-122.
[19] 南京农业大学. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 1986.
[20] 潘根兴. 中国土壤有机碳和无机碳库量研究. 科技通报, 1999, 15(5): 330-332.
[21] 王绍强, 周成虎, 李克让, 朱松丽, 黄方红. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析. 地理学报, 2000, 55(5): 533-544.
[22] 梁二, 蔡典雄, 张丁辰, 代快, 冯宗会, 刘爽, 王燕, 王小彬. 中国陆地土壤有机碳储量估算及其不确定性分析. 中国土壤与肥料, 2010, (6): 75-79.
[23] 王芸, 赵中秋, 王怀泉, 于艳蕊, 曹春旭. 土壤有机碳库与其影响因素研究进展. 山西农业大学学报: 自然科学版, 2013, 33(3): 262-268.
[24] 薛志婧, 马露莎, 安韶山, 王万忠. 黄土丘陵区小流域尺度土壤有机碳密度及储量. 生态学报, 2015, 35(9): 2917-2925.
[25] 张勇, 史学正, 赵永存, 于东升, 王洪杰, 孙维侠. 滇黔桂地区土壤有机碳储量与影响因素研究. 环境科学, 2008, 29(8): 2314-2319.
[26] Han F P, Hu W, Zheng J Y, Du F, Zhang X C. Estimating soil organic carbon storage and distribution in a catchment of Loess Plateau, China. Geoderma, 2010, 154(3/4): 261-266.
[27] Zhang C S, Tang Y, Xu X L, Kiely G. Towards spatial geochemical modelling: use of geographically weighted regression for mapping soil organic carbon contents in Ireland. Applied Geochemistry, 2011, 26(7): 1239-1248.
[28] 张忠华, 胡刚, 祝介东, 倪健. 喀斯特森林土壤养分的空间异质性及其对树种分布的影响. 植物生态学报, 2011, 35(10): 1038-1049.
[29] 郭晓伟, 骆土寿, 李意德, 许涵, 陈德祥, 林明献, 周璋, 杨怀. 海南尖峰岭热带山地雨林土壤有机碳密度空间分布特征. 生态学报, 2015, 35(23): 7878-7886.
[30] Hobley E U, Baldock J, Wilson B. Environmental and human influences on organic carbon fractions down the soil profile. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, 223: 152-166.
[31] Griggs D J, Noguer M. Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Weather, 2002, 57(8): 267-269.
[32] 李国栋, 张俊华, 陈聪, 田海峰, 赵丽萍. 气候变化背景下中国陆地生态系统碳储量及碳通量研究进展. 生态环境学报, 2013, 22(5): 873-878.
[33] 高鹏, 付同刚, 王克林, 陈洪松, 曾馥平. 喀斯特峰丛洼地小流域表层土壤养分的空间异质性. 农业现代化研究, 2013, 34(3): 362-366.
[34] 李阳兵, 罗光杰, 程安云, 邵景安, 白晓永, 王世杰. 黔中高原面石漠化演变典型案例研究—以普定后寨河地区为例. 地理研究, 2013, 32(5): 828-838.